DOI: 10.22067/jfcei.2021.69111.1026
سال سی و چهارم، شمارهٔ یک، ۱٤۰۰

تحلیل پدیده‌ی سنگ‌افت در دیواره‌ی پرشیب بااستفاده از مدل‌سازی با روش توده‌ای- کلوخه‌ای Rocfall و روش المان مجزا PFC^{3D}- مطالعه‌ی موردی *

مقاله پژوهشی

هادی فتاحی[1] میلاد صادقی گواری[2] حسین قائدی[2]

چکیده *سنگ‌افت یکی از انواع ناپایداری دامنه‌ای است که در اکثر مناطق کوهستانی رخ می‌دهد و موجب صدمات جانی و خسارات سنگین به تأسیسات، مناطق مسکونی، جاده‌ها، مزارع و وسایل نقلیه می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از صدمات مالی- جانی، پیش‌بینی و مدل کردن پدیده‌ی سنگ‌افت در دیواره‌های پرشیب برای انجام اقدامات پیش‌گیرانه ضروری می‌باشد. در این راستا در مقاله‌ی حاضر، به‌منظور ارزیابی خطر سنگ‌افت ابتدا بااستفاده از نرم‌افزار Rocfall مسیر حرکت سقوط سنگی بلوک‌های جداشده به‌صورت منفرد و جدا از هم در بحرانی‌ترین مقطع از ارتفاعات شمال باختری شهر شاهرود مورد تحلیل قرار گرفت. سپس به‌منظور درنظر گرفتن فعل و انفعالات بین ذرات در مسیر حرکت، شکل، اندازه و وزن قطعات از روش المان مجزای PFC^{3D} استفاده شد. با تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌کمک دو نرم‌افزار مذکور، این نتیجه حاصل شد که اگر سنگ‌افت اتفاق بیافتد، تعداد زیادی از قطعات در محدوده‌ی جاده‌ها و مناطق مسکونی توقف دارند که این توقف‌ها راه‌بندان در جاده و خطرات مالی- جانی را در پی خواهد داشت. به‌عبارتی دیگر باتوجه به این‌که بیشترین فاصله‌ی افقی طی‌شده توسط قطعات ۳۹۳ متر و فاصله‌ی افقی مناطق مسکونی ۳٤۰ متری می‌باشد، لذا احتمال حادثه در اثر سنگ‌افت بسیار بالا است. در ادامه‌ی پیشنهاداتی از جمله نصب توری‌های فلزی، ضربه‌گیرها، کاهش انرژی جنبشی در قطعات، تغییر در ابعاد قطعات، ایجاد تغییر در هندسه‌ی شیب جهت کاهش خطر و خسارات ناشی از سنگ‌افت در مقطع موردنظر ارائه شده‌است.*

واژه‌های کلیدی سنگ‌افت، روش توده‌ای- کلوخه‌ای، نرم‌افزار Rocfall، روش المان مجزا، نرم‌افزار PFC^{3D}.

Analysis of Rock Fall Phenomenon in Steep Wall Using Modeling by Rocfall Mass-Lump Method and PFC^{3D} Discrete Element Method - Case Study

H. Fattahi M. Sadeghi H. Ghaedi

Abstract *Rock fall is a type of slope instability that occurs in most mountainous areas and causes casualties and severe damage to facilities, residential areas, roads, farms and vehicles. Therefore, to prevent financial damage, it is necessary to predict and model the phenomenon of rock fall in steep walls to take preventive measures. In this paper, in order to assess the risk of falling rocks, first using Rocfall software, the path of rock fall of isolated blocks was analyzed individually and separately in the most critical section of the northwestern heights of Shahrood. In order to consider the interactions between particles in the path, shape, size and weight of the parts, the distinct element method PFC^{3D} was used. Analyzing the simulation results with the help of these two softwares, it was concluded that if the rock falls, a large number of parts will stop in the area of roads and residential areas, which will result in traffic jams and financial-human risks. In other words, considering that the maximum horizontal distance traveled by the plots is 393 meters and the horizontal distance between residential areas is 340 meters, so the probability of an accident due to falling rocks is very high. In the following, suggestions such as installation of metal grids, shock absorbers, reduction of kinetic energy in the parts, change in the dimensions of the parts, change of the slope geometry to reduce the risk and damage caused by falling rock in the desired section are presented.*

Key Word: Rock fall, Rocfall software, PFC^{3D} software, Mass-lump method, Distinct element method.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۲/۲۲ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.
Email: h.fattahi@arakut.ac.ir
(۲) دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.
(۳) دانشجوکارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

مقدمه

تحلیل پایداری بلوک‌های سنگی منفصل واقع بر شیب‌ها و دامنه‌ها که تحت عنوان سنگ‌افت نامیده می‌شود امروزه سبب شده‌است تا بسیاری از مهندسان و طراحان به پیش‌بینی رفتار این پدیده در شیب‌های سنگی روی آورند. عوامل متعددی در رخداد سنگ‌افت نقش دارند که از جمله‌ی آنها می‌توان به افزایش آب حفره‌ای در توده‌ی سنگ، فرسایش مصالح دربرگیرنده، هوازدگی در سنگ، زمین‌لرزه، اثر گوه‌ای ریشه‌ی درختان، تجزیه‌ی شیمیایی سنگ، فرآیند سریع یخ‌زدن و آب‌شدن اشاره کرد. اثرات ناپایداری دامنه‌ها به‌صورت حرکات توده‌ای در مقیاس کوچک تا وسیعی می‌باشد. حرکات دامنه‌ای ممکن است جزئی و منحصر به ریزش یک قطعه سنگ منفرد بوده یا این‌که بسیار بزرگ و فاجعه‌آفرین باشد. مکانیسم حرکتی رفتار سنگ بعد از جدا شدن از سطح شیب‌دار، در حقیقت ترکیبی از چهار فاز مختلف و اصلی لغزش، سقوط آزاد، چرخش و جهش می‌باشد. بنابراین می‌توان با تعیین درست مسیر ریزش قطعات که به‌صورت ارتفاع و طول مسیر، سرعت و انرژی قطعات طی ریزش بیان می‌شود، برای تعیین محل نصب سازه‌های حفاظتی مناسب اقدام کرد. انتهای مسیر حرکت قطعات به عواملی نظیر زبری، شیب، ارتفاع ریزش مربوط به دامنه و سه فاکتور استحکام، شکل و حجم قطعات بستگی دارد. در طول سالیان اخیر در ارتباط با پدیده‌ی سنگ‌افت پژوهش‌های متعددی انجام شده که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره خواهد شد.

ازرونی (Azzoni) و همکاران بااستفاده از مدل ریاضی و براساس مکانیزم جسم صلب و آنالیز آماری در یک فضای دوبعدی به بررسی بعضی از پارامترهای کاربردی سنگ‌افت پرداختند [1]. آززونی و فریتاس (Azzoni & Freitas) بااستفاده از آزمایش‌های برجا، با پرتاب قطعات سنگی و فیلم‌برداری از تمام مراحل حرکت آنها، پارامترهای مناسبی را برای تحلیل‌های ریزش سنگی ارزیابی کردند. این پارامترها شامل ضریب ارتجاعی، ضریب اصطکاک غلتشی، سرعت‌های انتقالی و غلتشی و ارتفاع جهش می‌باشد. آنها هم‌چنین تأثیر شکل و ابعاد بلوک‌ها را روی سرعت غلتشی و اثر وجود گودال را برروی مسیرهای ریزش بررسی کردند [2]. نیکت (Nicot) و همکاران بااستفاده از روش‌های تحلیل و آزمایشگاهی، تأثیر شبکه‌های فلزی (Anti-Sub-Marine) در توقف سنگ‌افت را بررسی کردند. آنها نشان دادند که این شبکه‌ها، دربرابر نیروی دینامیکی افت سنگ انعطاف‌پذیری بالایی دارند [3]. کوزتی (Guzzetti) و همکاران به‌منظور بررسی سقوط سنگ در مقیاس ناحیه‌ای و منطقه‌ای و به‌صورت سه‌بعدی برنامه‌ی STONE را طراحی کردند که قابلیت مدل کردن سنگ‌افت را به‌صورت سه فاز سقوط آزاد، غلتش و جهش دارد. داده‌های ورودی این برنامه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شد که شامل نقشه‌ی توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، ژئومورفولوژی، سرعت ابتدایی، ضرایب دینامیکی ارتجاعی و اصطکاک می‌باشند. برنامه‌ی مذکور دارای قابلیت مدل کردن منبع سقوط سنگ به سه حالت خطی، نقطه‌ای و ناحیه‌ای می‌باشد که نتایج حاصل به دو شکل دوبعدی و سه‌بعدی در محیط GIS ارائه می‌شوند [4]. دوارت و مارکوئیز (Marquínez& Duarte) تأثیر فاکتورهای محیطی و لیتولوژیکی را بر ایجاد ریزش‌های سنگی در مقیاس ناحیه‌ای و بااستفاده از نهشته‌های واریزه‌ای در محیط GIS بررسی نمودند. در این مطالعه از واریزه‌های جدید که توسط پوشش گیاهی دربرگرفته نشده‌اند، به‌عنوان نشانی برای فعالیت سقوط سنگ استفاده شده‌است. واریزه‌هایی که توسط گیاهان پوشیده شده‌اند، دال بر پایداری شیب‌ها و عدم فعالیت آنها می‌باشد. در تحقیق مذکور نقشه‌ی حوضه‌های سقوط سنگ با نقشه‌های متغیرهای محیطی (دما و باران)، ساختمانی و ژئومورفولوژی هم‌پوشانی شده‌است. نتایج حاصل حاکی از آن است که متغیرهای محیطی تأثیرات عمده‌ای بر فعالیت دامنه‌ها دارند. به‌خصوص که این

متغیرها در لیتولوژی‌های مختلف تأثیرات متفاوتی را ایجاد می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده فعالیت شدید سقوط سنگ در نقاط مرتفع‌تر را تأیید می‌کند. در مناطقی که لیتولوژی‌های مقاوم و نامقاوم به‌طور متناوب قرار دارند، سقوط سنگ‌ها بیشتر مشاهده می‌شود [5]. چائو (Chau) و همکاران بااستفاده از یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی ضرایب واجهشی برای بلوک‌های کروی‌شکل در شیب‌های سنگی را به‌دست آوردند. آنها هم‌چنین دریافتند که ضرایب واجهشی با افزایش زاویه‌ی شیب افزایش می‌یابد. هم‌چنین به‌طور کلی نسبت انرژی سیستماتیک چرخشی به انتقالی با افزایش زاویه‌ی شیب تا ۴۰ درجه، افزایش و سپس تا زاویه‌ی شیب ۷۰ درجه کاهش می‌یابد [6]. بیلی‌فرد (Baillifard) و همکاران نقشه‌ی خطر سقوط سنگ را بااستفاده از عوامل توپوگرافی، ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی و بااستفاده از GIS تهیه نمودند [7]. کوزتی و همکاران یک روش براساس افزایش حوادث ناشی از سنگ‌افت بااستفاده از تاریخچه و حجم سنگ‌افت و برپایه‌ی نتایج فیزیکی و مدل فضایی شبیه‌سازی سنگ‌افت برای تعیین خطر سنگ‌افت ارائه کردند. آنها اطلاعات مربوط به محل و نوع اقدامات مقابله‌ای دربرابر سنگ‌افت را بیان و این روش را در دره‌ی رودخانه نرا در منطقه‌ی Umbria ایتالیای مرکزی مورد استفاده قرار دادند [8]. چائو و همکاران بااستفاده از نرم‌افزار GIS به پهنه‌بندی خطر سقوط سنگ در هنگ‌کنگ پرداختند. آنها در تحقیق خود از چهار لایه‌ی اطلاعاتی زمین‌شناسی، مقدار و جهت شیب و طبقات ارتفاعی به‌عنوان عوامل اصلی در وقوع پدیده‌ی سقوط سنگ در این منطقه استفاده کردند [9]. پرت (Perret) و همکاران به مطالعه‌ی فعالیت مکانی و زمانی ریزش در مناطق جنگلی کوه‌های آلپ سوئیس پرداختند و نتیجه گرفتند وقوع ریزش فصلی در طول خواب درختان، در اوایل بهار به اوج می‌رسد. علاوه‌بر این، وقوع ریزش با درجه‌ی حرارت تابستان و زمستان در ارتباط است، ولی هیچ هم‌بستگی با بارش سالانه یا فصلی ندارد [10]. سابویا (Saboya) و همکاران برای ارزیابی ناپایداری‌های دامنه در ریودوژانیروی برزیل، از منطق فازی استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در این مدل چون به‌صورت صفر و یکی نیست، نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها به‌دست می‌آید [11]. باترسون (Batterson) و همکاران در مطالعه‌ای ارزیابی خطرات زمین‌شناسی از جمله سنگ ریزش را در دره‌ی هامبر در شمال شرق آوالون در کانادا انجام دادند، و به این نتیجه دست یافتند که در شیب‌های ۲۲ تا ۳۰ درجه بیشترین ریزش‌های منطقه اتفاق افتاده‌است [12]. توپال (Topal) و همکاران به بررسی سنگ‌افت در شهر افیون ترکیه پرداختند. قلعه‌ی افیون یک مکان توریستی در شهر افیون ترکیه است که در یک تپه‌ی شیب‌دار قرار گرفته‌است و در مجاورت قلعه سکونتگاه‌هایی وجود دارد که در معرض خطر سنگ‌افت قرار دارند. آنها بااستفاده از نرم‌افزار Rocfall به بررسی سنگ‌افت و محاسبه‌ی ارتفاع جهش، انرژی جنبشی، سرعت سنگ‌ها و نقطه‌ی توقف بلوک‌ها در طول مسیر پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که برای مناطقی که مستعد خطر ریزش سنگین هستند، اقداماتی نظیر پیچ‌سنگ و نرده‌های محافظ قابل پیشنهاد است [13]. لان (Lan) و همکاران برای تسهیل ارزیابی خطرات ریزش سنگی در محیط GIS، زیربرنامه‌ای را تحت عنوان Rockfall Analyst ارائه نمودند که ترکیبی از یک مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند ریزش سنگی با مدل‌سازی GIS است [14]. جیکومینی (Giacomini) و همکاران با انجام ۲۰ آزمایش سقوط سنگ، دید تازه‌ای در مورد قطعه‌قطعه شدن بلوک‌های سقوط کرده به‌خصوص بلوک‌های دارای فولیاسیون، هنگام برخورد با سطح زمین ایجاد کردند. این آزمایش‌ها در معدنی در شمال‌غرب ایتالیا برروی دو نوع سنگ با شیستوزیته‌ی متفاوت صورت گرفت [15]. چوی (Choi) و همکاران بااستفاده از مدل بارتون و نرم‌افزار Rocfall به حل مشکل خطر ریزش ایالت سوک‌گای‌اوراک در کره‌ی جنوبی پرداختند و بیان کردند ۸۰ درصد

تخته‌سنگ‌های در حال سقوط، دارای وزن حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم هستند، میانگین سرعت آنها ۸/٤ متر در ثانیه است و حداکثر انرژی جنبشی این سنگ‌ها ۱۲/۵ کیلوژول است [16]. تونسول اوغلو و زورلو (Zorlu Tunusluoglu &) به‌کمک مشاهدات میدانی و بااستفاده از نرم‌افزار Rocfall نقشه‌ی پهنه‌بندی وقوع ریزش قلعه‌ی اورتا حصار در منطقه‌ی کاپادوکیه در کشور ترکیه را ترسیم کردند [17]. آندریس و لکاس (Antoniou Lekkas&) در تحقیق خود به بررسی و آنالیز پدیده‌ی سقوط سنگ در قسمتی از جزیره‌ی Santorini در کشور یونان پرداختند. در این بخش از جزیره، سقوط سنگ در اطراف جاده خطراتی را برای وسایل نقلیه و ساکنان محلی ایجاد کرده بود. آنها بااستفاده از نرم‌افزارهای ArcView و Rocfall منطقه‌ی مورد مطالعه را پهنه‌بندی و آن را به سه زون با خطر کم، متوسط و زیاد تقسیم کردند [18]. رممر (Rammer) و همکاران در رشته کوه‌های آلپ از مدار اتریش تا سوئیس بااستفاده از مدل Rocfall به بررسی خطر ریزش پرداختند [19]. هوانگ (Huang) و همکاران با مطالعه درمورد اثرات بارندگی‌ها بر گسیختگی‌های کم‌عمق دامنه‌ای به‌روش تجربی بدین نتیجه رسیدند که با پیدایش هرگونه گسیختگی در پای دامنه تحت هر عاملی، گسیختگی‌های متوالی به بخش بالادست دامنه سرایت می‌کند و ارتباط تنگاتنگی بین عوامل درونی و بیرونی در شکل‌گیری گسیختگی و ریزش سنگ‌ها در جاده‌ها وجود دارد [20]. ولکوین (Volkwein) و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی کلی، انواع مدل‌های مطرح در پهنه‌بندی ریزش و نیز اقدامات حفاظتی درراستای مقابله با این خطر پرداختند [21]. اسپاداری (Spadari) و همکاران، ارزیابی آماری از محدوده‌ی انرژی سنگ‌افت برای پنج شرط زمین‌شناسی مختلف در استرالیا را بررسی کردند. آنها با آنالیز آماری تصادفی دریافتند که برای دو مطالعه‌ی موردی سنگ‌افت، میانگین انرژی ضربه ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوژول و برای سه مورد دیگر کمتر از ۱۰۰ کیلوژول می‌باشد که ۹۵ درصد این مقدار انرژی، باید برای طراحی سازه‌های حفاظتی دربرابر سنگ‌افت درنظر گرفته شود [22]. یوسف (Youssef) و همکاران در تحقیق خود به بررسی و آنالیز سنگ‌افت در کوه النور در عربستان پرداختند. کوه النور یکی از مناطقی است که به‌دلیل وجود غار هیرا، پیست اسکارپمنت و مناطق شهری اطراف آن به‌علت ریزش سنگ بسیار پرخطر است. محققان دست یافتند که شیب تند، هوازدگی، فرسایش، اثرات انسانی و بارندگی از دلایل سنگ‌افت در این منطقه است. بنابراین آنها سعی کردند که بااستفاده از سنجش از راه دور، نرم‌افزارهای عددی و مطالعات میدانی، مناطق ناپایدار را شناسایی کنند. تجزیه و تحلیل نشان داد که ریزش سنگ در منطقه‌ی ۱ و ۲ کوه النور ممکن است به مناطق شهری برسد، درحالی‌که ریزش سنگ در منطقه‌ی ۳ به منطقه‌ی شهری نخواهد رسید و ریزش سنگ در امتداد جاده‌ی پیست آل‌نور تأثیر زیادی برروی گردشگران دارند و بایستی در هر ۳ منطقه اقدامات پیشگیرانه‌ای انجام شود [23]. کسکین (Keskin) و همکاران به بررسی خطر سنگ‌افت در جاده‌ای می‌پردازند که در پایین‌دست آن مناطق مسکونی عبور می‌کند. تجزیه و تحلیل سنگ‌افت در جاده‌ی زونگولداک- کلیملی در ترکیه براساس تحقیقات میدانی، مطالعات آزمایشگاهی و بااستفاده از نرم‌افزار Rocfall انجام شده‌است. آنها به این نتیجه رسیدند برای جلوگیری از خطرات ساختمان‌های مسکونی در پایین‌دست، از آنجا که تغییر هندسه‌ی شیب امکان‌پذیر نیست، سد بتنی در کنار جاده را به‌عنوان یک اقدام پیشگیرانه توصیه کردند [24]. هی (He) و همکاران با بررسی‌های دقیق میدانی، نقشه‌برداری زمین‌شناسی، تجزیه و تحلیل حرکتی و مدل‌سازی عددی خطر ریزش سنگ‌ها را در شهر میانسی از شهرستان ونچوان، استان سیچوان چین تحت تأثیر زلزله بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سنگ‌های درزه‌دار پس از زلزله سبب جدایش شده و علاوه‌بر ریزش در جاده سبب تحریک سنگ‌های بدون درزه در پایین‌دست می‌شوند. آنها

هم‌چنین اثر بارندگی برروی سنگ‌افت را مورد بررسی قرار دادند [25].

مطابق با تحقیقات انجام‌شده، تاکنون مطالعات زیادی در این خصوص انجام شده‌است، اما از آنجا که نرم‌افزار Rocfall تنها مسیر حرکت را شبیه‌سازی می‌کند و عواملی نظیر شکل، اندازه، وزن قطعات و هم‌چنین فعل و انفعالات بین ذرات در مسیر حرکت (ذرات به‌صورت منفرد و جدا از هم) را درنظر نمی‌گیرد و شبیه‌سازی نمی‌کند از واقعیت سنگ‌افت فاصله دارد. درصورتی‌که در واقعیت، قطعات در حال ریزش و سقوط برروی یکدیگر تأثیرگذار هستند. بنابراین در این تحقیق به‌منظور تطابق بیشتر با محیط واقعی منطقه‌ی شاهرود، و برای پوشش و رفع نواقص نرم‌افزار Rocfall از نرم‌افزار پرقدرت PFC^{3D} استفاده شده‌است تا علاوه‌بر شناسایی سرعت و مسیر سنگ‌ها، فعل و انفعالات بین ذرات و دیواره‌ها و بین ذرات با یکدیگر در حین حرکت در پایین‌دست درنظر گرفته شود تا به شرایط موجود در طبیعت نزدیک‌تر باشند و بتوان نتایج قابل قبول و مطمئن‌تری را از شبیه‌سازی به‌دست آورد. بنابراین در این مقاله بااستفاده از دو نرم‌افزار مذکور به‌منظور کامل‌تر شدن اطلاعات در جهت بررسی خطر سنگ‌افت، به شبیه‌سازی مکانیسم ریزش سنگی، تعیین میزان جابه‌جایی توده‌های ریزشی و هم‌چنین بررسی راهکارهای مقابله و جلوگیری از این ریزش‌ها و خطرات ناشی از آن‌ها در منطقه‌ی شاهرود پرداخته شده‌است.

معرفی نرم‌افزار Rocfall

نرم‌افزار Rocfall یک برنامه‌ی تحلیلی- آماری دوبعدی است که توسط استیونز (Stevens) برای شبیه‌سازی سقوط سنگ ایجاد شده‌است. استفاده از این روش تحلیل احتمالی و متغیرهای تصادفی در متغیر جرم، شرایط اولیه و سرعت سنگ و هم‌چنین در متغیرهای ضرایب ارتجاعی، زاویه‌ی اصطکاک و موقعیت رئوس شیب‌ها، در شبیه‌سازی این برنامه نتایج آماری مفیدی در اختیار قرار می‌دهد و مشکلات مرتبط با عدم قطعیت داده‌های ورودی را کاهش می‌دهد. خروجی‌های این برنامه به‌صورت منحنی‌ها و نمودارهای توزیع ماکزیمم سرعت، انرژی جنبشی، ارتفاع پرش و مکان توقف سنگ در سرتاسر طول شیب می‌باشد [26]. از نتایج این نرم‌افزار می‌توان برای طراحی دیوارهای حائل استفاده کرد. تغییرات جزئی در مقدار ضریب ارتجاعی تأثیرات کاملا آشکاری در مقدار متغیرهای خروجی این برنامه از جمله ارتفاع پرش سنگ‌ها و مسافت طی‌شده دارد و محاسبه‌ی مقدار دقیق آن نتایج شبیه‌سازی را صحیح‌تر می‌کند که براساس آن می‌توان محل، اندازه و استحکام مورد نیاز دیوار حائل را تخمین زد [26].

این برنامه از سه الگوریتم برای آنالیز و محاسبه‌ی حرکت سنگ استفاده می‌کند که عبارتند از الگوریتم ذره، الگوریتم جهش و الگوریتم لغزش. الگوریتم ذره همه‌ی پارامترهای شبیه‌سازی را دریافت می‌کند و شرایط اولیه را برای الگوریتم سقوط و الگوریتم پرتاب فراهم می‌نماید. الگوریتم پرتاب برای محاسبه‌ی حرکت سنگ در حالت جهش و الگوریتم سقوط برای محاسبه‌ی حرکت در زمانی که سنگ با سطح شیب‌دار برخورد و به‌سمت پایین حرکت می‌کند، استفاده می‌شود. از تلاقی خط شیب مقطع مدل‌شده و مسیر سهمی توده‌سنگ در لحظه‌ی برخورد و حل معادله‌ی درجه‌ی دوم می‌توان سرعت، انرژی و ارتفاع پرش را در هر نقطه تعیین نمود [26].

معرفی نرم‌افزار المان مجزای PFC

نرافزار PFC از مجموعه نرم‌افزارهای گروه ITASCA است که برای محیط‌های ناپیوسته تهیه شده‌است. این نرم‌افزار از روش المان مجزا برای شبیه‌سازی مدل‌های خود استفاده می‌کند. در این روش توده‌سنگ به‌صورت یک محیط ناپیوسته و برمبنای روش اجزای گسسته و ذره‌ای درنظر گرفته می‌شود که رفتار مواد را بااستفاده از محیط ذره‌ای و دایره‌ای در حالت دوبعدی و سه‌بعدی

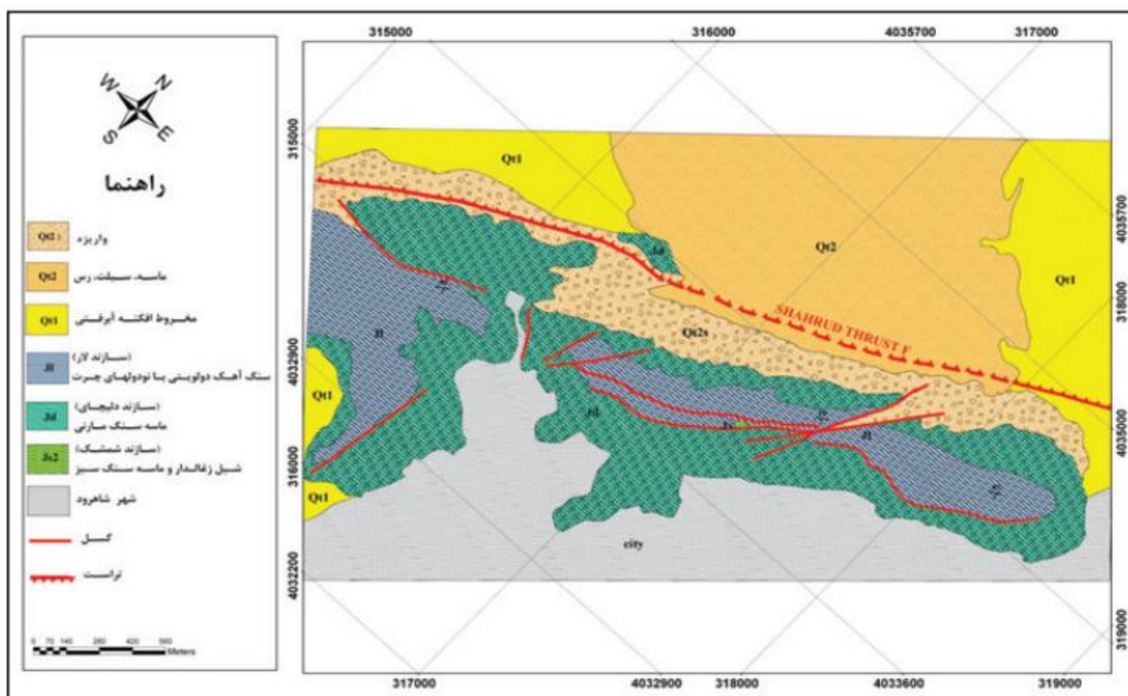
تحلیل می‌کند. بنابراین تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌های سنگی، لایه‌بندی، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌ها قابل بررسی است. این روش باتوجه به ماهیت ناپیوسته بودن محیط‌های سنگی روش کاملا مناسبی برای بررسی تغییرشکل و شکست توده‌های سنگی می‌باشد. در این روش برای شبیه‌سازی مسیرهای توده سنگ و محاسبه‌ی انرژی سنگ در حال سقوط و روابط برخورد بین عناصر استفاده می‌شود. نرم‌افزار PFC حرکت و تعامل با سطح مقطع دایره‌ای (2D) و یا کروی (3D) ذرات و عناصر دیوار را بااستفاده از قوانین حرکت و نیروی جابه‌جایی مدل‌سازی می‌کند. در طول محاسبه، تماس بین ذرات با ذرات یا ذرات با دیوارها به‌طور خودکار شناسایی می‌شود. ذرات ممکن است در نقاط تماس باهم پیوند داشته باشند و این پیوند به‌سبب برخورد می‌تواند شکسته شود. بنابراین می‌توان بااستفاده از دستورات نرم‌افزار PFC^{3D} انواع حرکت (جهشی، لغزشی، غلتشی و سقوط آزاد یک توده سنگ منفرد) و تعامل بین بلوک‌ها را در سقوط توده سنگ مدل‌سازی کرد [27,28].

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده‌ی مطالعاتی

شهر شاهرود بزرگ‌ترین شهرستان استان سمنان می‌باشد که از شمال به ارتفاعات سلسله جبال البرز و شهرستان گنبد کاووس و گرگان، از شرق به شهرستان سبزوار، از جنوب به دشت کویر و استان اصفهان و از غرب به شهرستان دامغان مرتبط می‌شود. شاهرود به‌لحاظ موقعیت ممتاز و ویژه‌ی جغرافیایی و قرار گرفتن بین رشته‌کوه‌های البرز و سرزمین‌های کویری همواره از جمله جاذبه‌های گردشگری ایران بوده‌است. از آنجایی که این منطقه یک مکان تفریحی در شمال شهر شاهرود می‌باشد هر ساله گردشگرانی برای بازدید از این منطقه به این شهر سفر می‌کنند اما از آنجا که این محدوده در معرض برخورد قطعات سنگی است در مواردی ریزش توده‌سنگ در جاده‌ها سلامتی گردشگران را به خطر می‌اندازد. هم‌چنین مزار شهدای گمنام در پایین‌دست منطقه، فضای سبز واقع در شمال هتل جهانگردی، شماری از منازل مسکونی پایین‌دست، بخشی از فضای سبز حاشیه‌ی جنوبی محل تفریحی آبشار و حاشیه‌ی باختری جاده‌ی کاج نیز در این محدوده قرار دارد، بنابراین بررسی پدیده‌ی سنگ‌افت و راهکارهای مقابله با آن برای این منطقه بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

منطقه‌ی مورد مطالعه، ارتفاعات شمال باختری شهر شاهرود است. برای مطالعه‌ی دقیق‌تر نقشه‌ی زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس منطقه (۱/۱۰۰۰۰) از عکس‌های هوایی استفاده شده‌است. شکل (۱) نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

قله‌ها و بخش مرتفع ارتفاعات، متعلق به سازند آهکی صخره ساز لار است. در زیر آهک لار، سازند دلیچای (تناوب آهک مارنی و مارن) قرار دارد که نسبت‌به فرسایش مقاومت کمتری دارد. رخنمون کوچکی از شیل زغال‌دار شمشک نیز در زیر سازند لار به‌صورت فرسایش یافت می‌شود. در همبری سازندها اختلاف فرسایش سبب شده‌است که آهک‌های لار به‌صورت معلق درآیند. علاوه‌بر عامل فرسایش، حضور دو گسل موازی با روند ارتفاعات یکی در مرز سازند لار با دلیچای و شمشک و یکی درون سازند لار سبب به‌وجود آمدن پرتگاه‌هایی به‌ارتفاع ۳ تا ٤ متر شده‌است. تکتونیزه بودن سازندها، هوازدگی ناشی از اختلاف دمای شبانه‌روزی و وجود شمار زیاد روزهای یخبندان در طول سال و فرایند ذوب و انجماد آب در درزه و شکاف‌ها سبب شده‌است تا پرتگاه‌های موجود استعداد بالایی برای ریزش قطعات سنگی داشته باشند. شکل (۲) نمایی از واریزه‌ها را در محل نشان می‌دهد. در برخی از مناطق نیز قطعاتی بسیار بزرگ به ابعاد چند ده مترمکعب دیده می‌شود.



شکل ۱ نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه‌ی مورد مطالعه



شکل ۲ واریزه‌های موجود در دامنه‌ی مشرف به جاده و مناطق مسکونی

همان‌طور که ذکر شد منطقه‌ی مورد مطالعه متعلق به ایالت زمین ساختی البرز شرقی است. البرز شرقی در طی ادوار زمین‌شناسی متحمل رویدادهای مختلفی از جمله رخداد کوه‌زایی، چین‌خوردگی و گسلش‌های متعدد بوده‌است. در ورقه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود چین‌خوردگی‌ها شامل ساختمان‌های تاقدیسی و

ناودیسی با روند شمال شرق- جنوب غربی و یا شرقی- غربی و از انواع متقارن یا نامتقارن می‌باشد. سیستم اصلی گسل‌ها به‌صورت راندگی‌ها و سپس گسل‌های امتداد لغز است. راندگی‌های موجود دارای امتداد شرقی- غربی است و حرکات قابل توجهی را از شمال به جنوب انجام داده‌اند. این راندگی‌ها در جایی که شیب گسل به صفر نزدیک شده‌است، سفره‌های رورانده را به‌وجود آورده‌اند. در محدوده‌ی مورد مطالعه نیز واحدهای مختلف چینه‌شناسی دارای چین‌خوردگی‌های واضح و مشهودی می‌باشد. از آنجا که توده‌سنگ به‌صورت یکپارچه نیست و دارای درزه و شکستگی‌های متعدد می‌باشد و از طرفی در تنش‌های پایین که در اعماق کم وجود دارد، رفتار توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود، لذا شناخت خصوصیات درزه‌ها در ارزیابی پایداری شیب‌های سنگی ضروری می‌باشد. به این منظور، ارتفاعات شاهرود که دارای درزه‌های مستعد ریزشی می‌باشد با رس و سیلت پر شده‌اند.

نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش توده‌ای- کلوخه‌ای RocFall

به‌منظور بررسی وضعیت پایداری دامنه در منطقه‌ی مورد مطالعه باتوجه به نقشه‌ی توپوگرافی و بازدیدهای صحرایی، مناطق بحرانی شناسایی شدند. وجود نقاط منشأ ریزش سنگی، اصلی‌ترین معیار برای بحرانی بودن شرایط درنظر گرفته شدند. از ویژگی‌های چنین مناطقی، شیب تند و گاهی معلق یا شیب منفی، حضور قطعات ریزشی بسیار بزرگ در پای دامنه یا برروی دامنه و وجود مناطق مسکونی در فاصله‌ی نزدیک به دامنه می‌باشد. با این اوصاف مقطعی مورد ارزیابی قرار گرفت که به‌دلیل وجود منطقه‌ی مسکونی در پایین‌دست این مقطع، در صورت ریزش سنگ‌افت، شرایط بحرانی را برای ساکنان آن ایجاد می‌کرد. خصوصیات درزه‌ها در مقطع مدنظر که سبب ریزش سنگ‌افت شده مطابق جدول (۱) و (۲) می‌باشد.

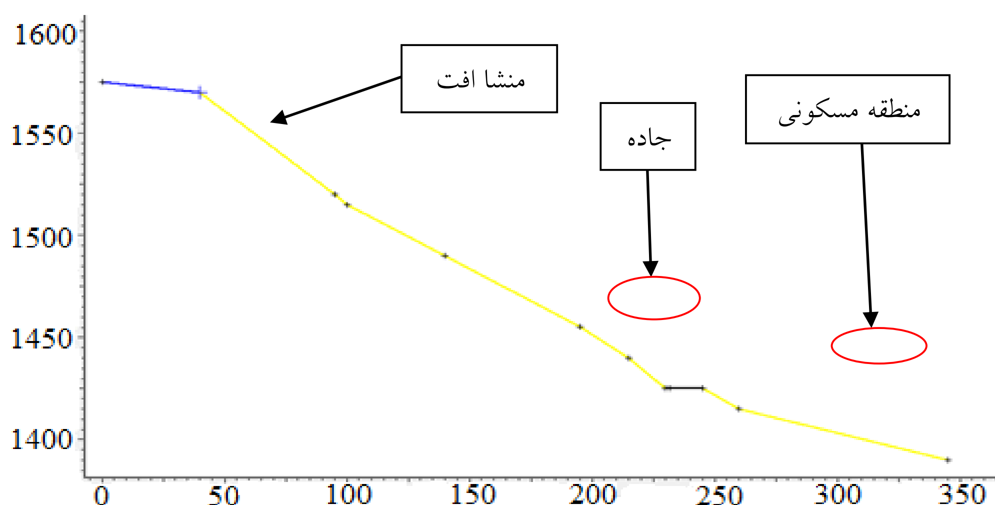
همان‌طور که قبلا اشاره شد، از نرم‌افزار RocFall برای شبیه‌سازی پدیده‌ی سنگ‌افت در مقطع مورد نظر استفاده شده‌است. این مقطع باتوجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده به‌صورت شکل (۳) می‌باشد.

جدول ۱ خصوصیات درزه‌های اصلی در مقطع مورد نظر

دسته درزه	میانگین شیب	جهت شیب	فاصله‌داری (cm) ماکزیمم	فاصله‌داری (cm) میانگین	فاصله‌داری (cm) مینیمم	پرشدگی	حداکثر بازشدگی(cm)
۱	٤٤	۱۳۷	۱۸۰	۹٤	۳۰	رس	۲
۲	٦٦	۳٥۰	٤۰٦	۷۸	١٦	رس	۱
۳	۸۱	۳۱	۱۲۷	٥٤٦	١٦	سیلت	۱۰
٤	۷٤	۲٤۲	۱۸۳	٤۷	۷/۳	رس	۲
٥	٤۸	۳۰۲	۱۸۰	۹٤	۳۰	رس	۳

جدول ۲ خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی در مقطع مورد نظر

دسته درزه	φ_b	ضریب زبری (JRC)			مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			φ_p (میانگین)
		ماکزیمم	میانگین	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	مینیمم	
۱	۳۱	۸	۶/۳۳	۴	۵۹۵	۵۳۴	۳۶۰	۴۹/۹
۲	۳۱	۹	۷	۵	۵۶۰	۴۶۷	۳۹۵	۵۲/۸
۳	۳۱	۸	۷	۵	۵۶۵	۵۵۲	۵۴۰	۵۶/۹
۴	۳۱	۸	۶/۴۶	۴	۵۹۰	۴۴۶	۱۸۰	۵۴/۸
۵	۳۱	۸	۷/۲	۶	۵۸۵	۴۷۰	۳۴۰	۵۱/۷



شکل ۳ نیمرخ مقطع مورد نظر (واحد محورهای مختصات به متر است)

در شکل (۳) نقاط منشأ ریزش تعیین شده‌اند و برای بخش‌های مختلف دامنه مطابق جدول (۳)، ضرایب ارتجاعی، ضریب اصطکاک و زبری متناسب با ویژگی‌های آن تعیین و وزن بزرگ‌ترین قطعات در هر مقطع بااستفاده از برداشت‌های صحرایی برپایه‌ی فاصله‌داری درزه‌ها مشخص شده‌است.

مطابق شکل (۴) در این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ریزش در طی هر بار اجرای برنامه تنظیم شده‌است و بزرگ‌ترین قطعه در مقطع دارای وزن معادل ۳۶۰۰ کیلوگرم می‌باشد.

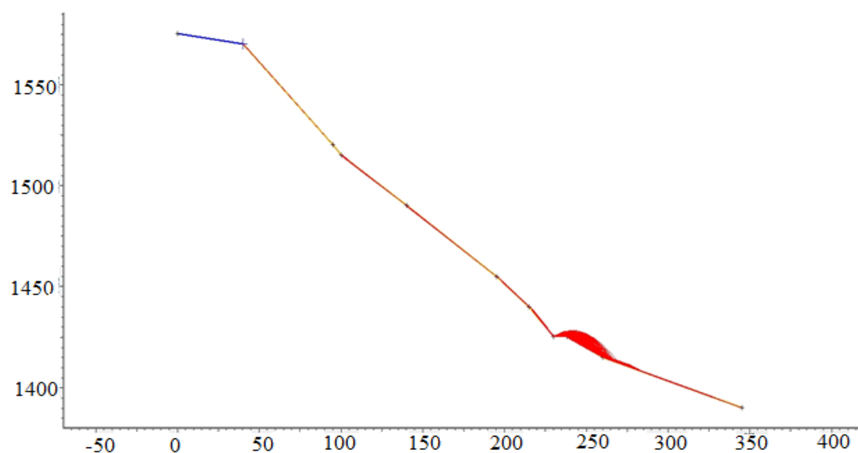
باتوجه به تعداد سنگ‌های در طول مسیر سقوط می‌توان مشاهده کرد که پس از ریزش محل توقف تعداد زیادی از سنگ‌ها در فاصله‌ی ۲۶۰ متری تا ۳۴۰ متری که محل عبور جاده است می‌باشد، همچنین تعدادی از قطعات در مسیر جاده توقف دارند، درصورت سنگ‌افت، این توقف‌ها، باعث بسته شدن جاده و ایجاد حوادث و خطرات جبران‌ناپذیری برای ساکنان این مناطق می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، تغییرات در سرعت اولیه و وزن قطعات تأثیر قابل توجهی در تعداد و محل توقف قطعات ندارد.

در این منطقه و مطابق شکل (۶)، باتوجه به ارتفاع پرش قطعات سنگی در طول مسیر می‌توان محدوده‌هایی که قطعات لغزش، غلتش یا جهش دارند را مشخص کرد؛ از نمودارهای به‌دست‌آمده به‌کمک نرم‌افزار مشخص می‌شود که قطعات در حد فاصل ۹۵ تا ۱۱۰ متری با جهشی حدود ۰/۷۵ متر و در فاصله‌ی ۲۵۰ متری جهشی بالای ۷ متر دارد. ابتدا و انتهای مسیر حرکت، قطعات به‌صورت لغزش یا غلتش حرکت می‌کنند. همچنین

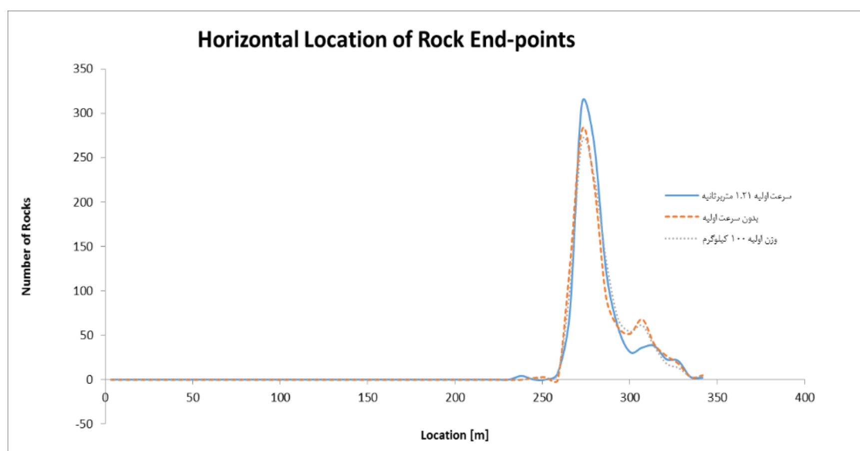
باتوجه به تغییرات در وزن و سرعت اولیه و نمودارهای حاصل از آنها می‌توان به این نتیجه رسید که این تغییرات نقش زیادی در تعیین ارتفاع پرش ندارند.

جدول ۳ ویژگی‌های مواد سازنده‌ی دامنه‌ی مورد نیاز در ورودی برنامه

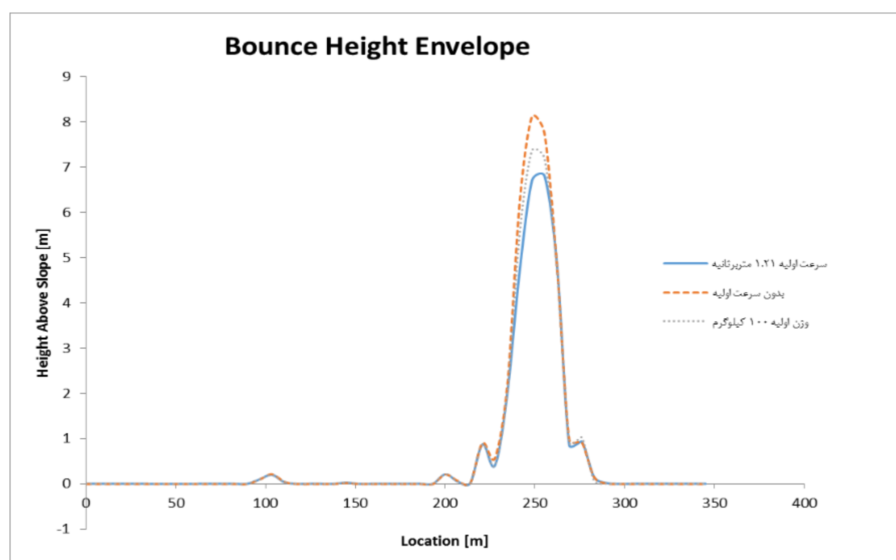
	بخش بالایی دامنه	بخش پایینی دامنه
نوع سنگ‌های دامنه	سنگ آهک‌های توده‌ای و مقاوم لار	سنگ آهک مارنی پوشیده با مقدار زیادی سنگ‌ریزه و کمی پوشش گیاهی
زبری دامنه (انحراف معیار از شیب میانگین)	۲	۲
زاویه‌ی اصطکاک دامنه (درجه)	۳۰	۳۰
ضریب ارتجاعی عادی (بدون واحد)	۰/۵	۰/۳۳
ضریب ارتجاعی مماسی (بدون واحد)	۰/۹۵	۰/۸۷



شکل ٤ مسیرهای طی‌شده‌ی قطعات در مقطع در طی ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی



شکل ۵ مسافت طی‌شده



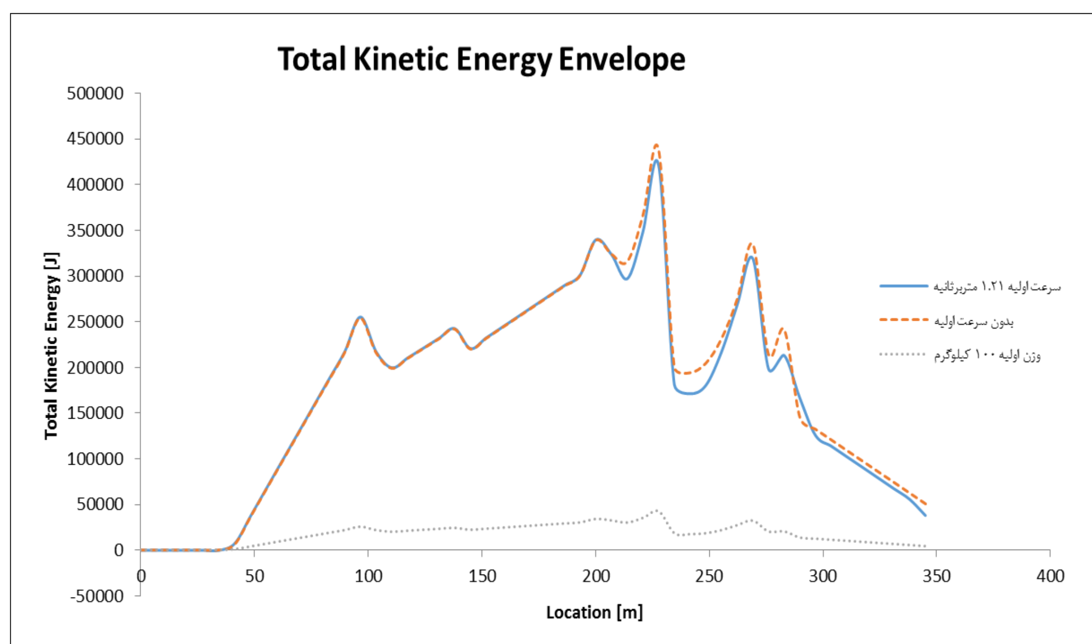
شکل ٦ ارتفاع پرش قطعات در طول مسیر (متر)

قطعات سنگ در مسیر حرکت در طی ریزش انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد که بعد از جهش و برخورد با سطح شیب مقداری از انرژی جنبشی کاسته می‌شود. این کاهش به‌دلیل تغییر محسوس در ضریب ارتجاعی سطح جاده نسبت‌به سطوح دیگر شیب در محدوده‌ی جاده بیشترین مقدار را دارد. انرژی جنبشی در انتهای مسیر به‌دلیل کم شدن شیب دامنه و تغییر نوع حرکت از حالت جهشی به غلتشی و لغزشی، با کاهش روبه‌رو می‌شود. شکل (۷) انرژی جنبشی در طی ریزش را نشان می‌دهد. هم‌چنین مطابق شکل (۸) سرعت انتقالی در طی مسیر رفتاری شبیه به رفتار انرژی جنبشی دارد و تغییر نوع حرکت باعث نوسانات سرعت می‌شود.

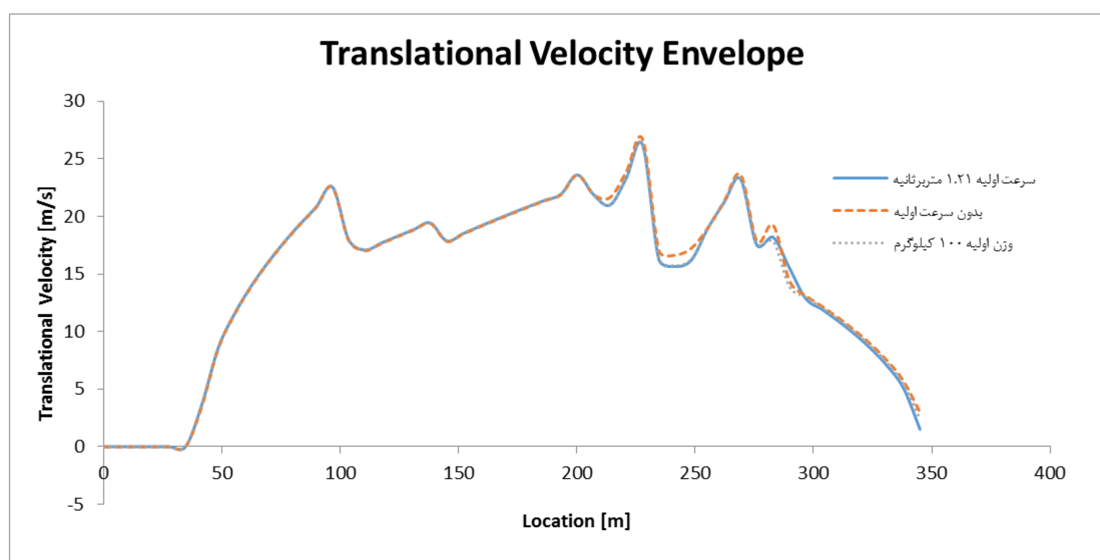
باتوجه به نمودارهای به‌دست آمده از شبیه‌سازی سنگ‌افت می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش وزن قطعه سنگ، تغییر خاصی در میزان بیشترین مسافت طی شده و سرعت، حاصل نشده‌است و انرژی جنبشی کل قطعه تنها عاملی است که دست‌خوش تغییرات شده و به‌طور آشکاری افزایش یافته‌است. بنابراین می‌توان از ویژگی‌های توپوگرافی‌های دامنه و وزن قطعه سنگ‌های ایجادشده در منشأ افت به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده‌ی نوع و میزان متغیرهای مختلف حرکت نام برد. باتوجه به منشأ سنگ‌افت و توپوگرافی دامنه‌ی موجود، همه‌ی نقاط میان منشأ سنگ‌افت و محل توقف قطعات ریزشی، مستعد برخورد قطعات سنگی است که می‌تواند سبب خسارت‌های زیادی شود. بدیهی است که برخورد قطعات در پهنه‌های بالاتر بیشتر است، ازاین‌رو باتوجه به محل توقف مصالح ریزشی می‌توان محدوده‌ی در معرض خطر را تعیین کرد.

مطابق نمودارهای به‌دست‌آمده و محل قرار گرفتن جاده و تأسیسات انسانی در دامنه‌ی شیب، درصورت وقوع سنگ‌افت در منطقه‌ی مورد نظر قطعه سنگ‌های جدا شده از منشأ سنگ‌افت، با ارتفاع جهش ۷ متر، سرعت ١٦ متر بر ثانیه و هم‌چنین انرژی جنبشی ۱۷۰ کیلوژول است و باعث ایجاد خطر ریزش در جاده می‌شود. هم‌چنین باتوجه به ماکزیمم مسافت طی‌شده، سرعت ۳ متر بر ثانیه و انرژی جنبشی ۵۰ کیلوژول قطعه سنگ باعث به‌وجود آمدن خسارت‌های جانی و مالی در صورت سنگ‌افت در منطقه خواهد شد. برای جلوگیری

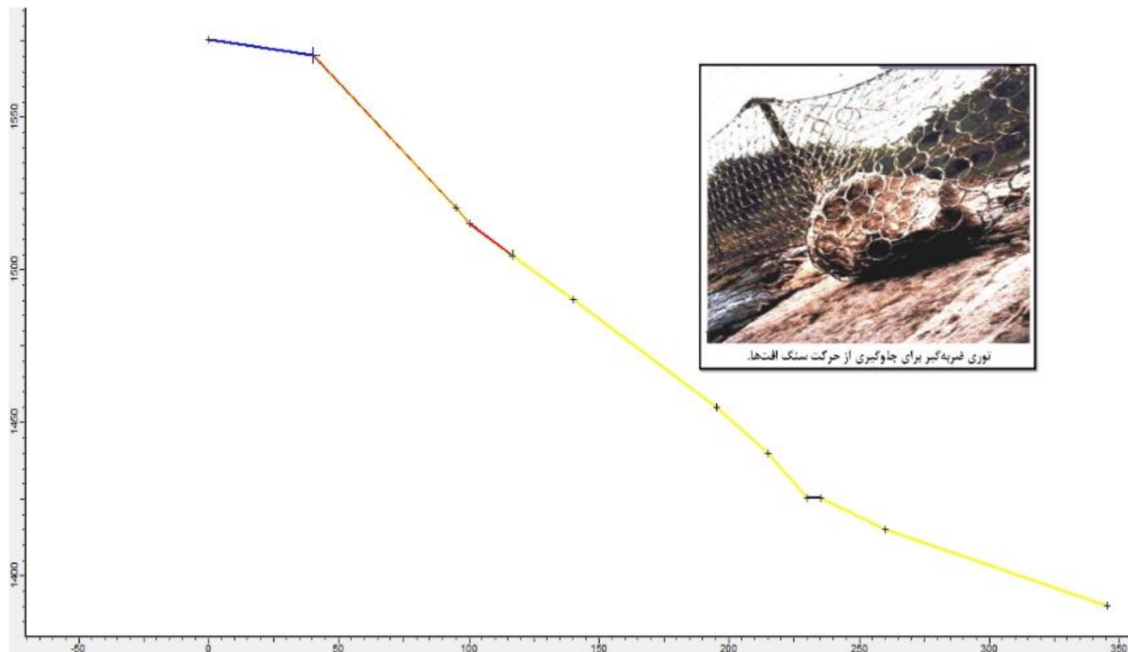
از رسیدن قطعات به جاده، می‌توان از دیوار حائل استفاده کرد. باتوجه به نتایج شبیه‌سازی به‌منظور جلوگیری سنگ‌افت، مطابق شکل (۹)، محل قرار گرفتن مانع باتوجه به افت انرژی در بالای جاده در ارتفاع ۱۵۰۷ متری می‌باشد تا بتوان از رسیدن سنگ‌ها به مسیر جاده جلوگیری کرد. هم‌چنین باتوجه به شکل (۱۰) و ارتفاع پرش، ارتفاع مانع حداقل باید ۱/۵ متر درنظر گرفته شود. ظرفیت مورد نیاز این مانع پس از شبیه‌سازی ۲۰۰ کیلوژول به‌دست آمده‌است.



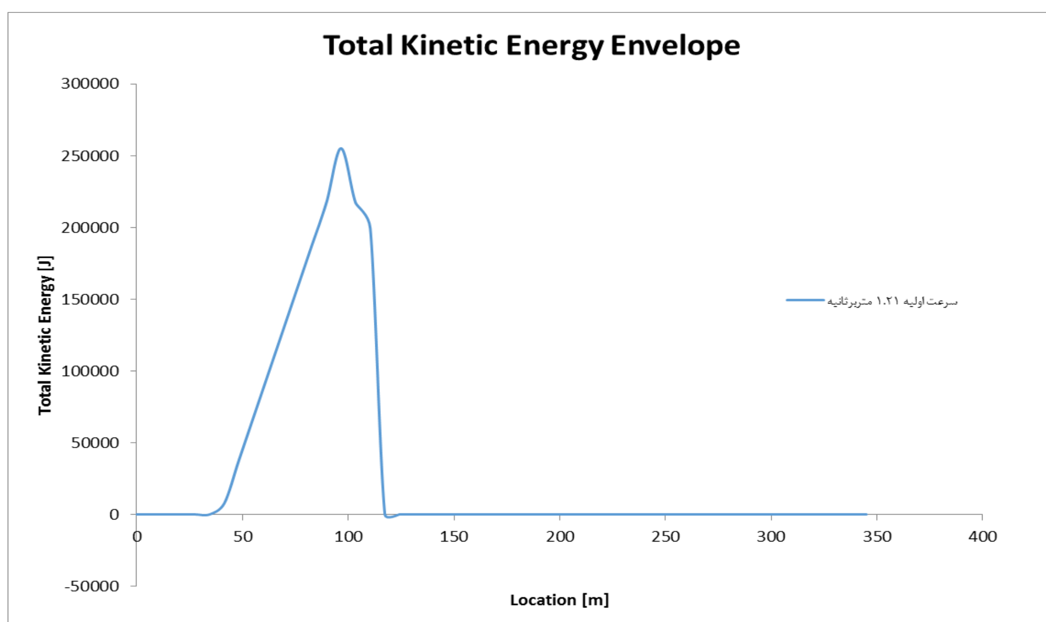
شکل ۷ انرژی جنبشی در طی ریزش (ژول)



شکل ۸ سرعت انتقالی در طی مسیر (متر بر ثانیه)



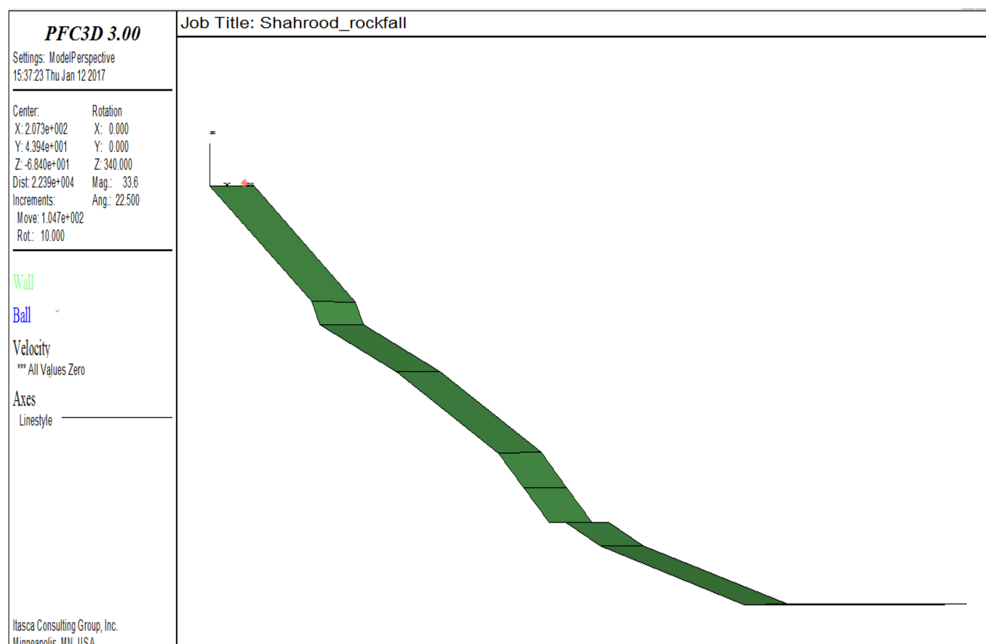
شکل ۹ محل قرار گرفتن مانع



شکل ۱۰ انرژی جنبشی کل بعد از اجرای مانع

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌روش المان مجزا PFC^{3D}

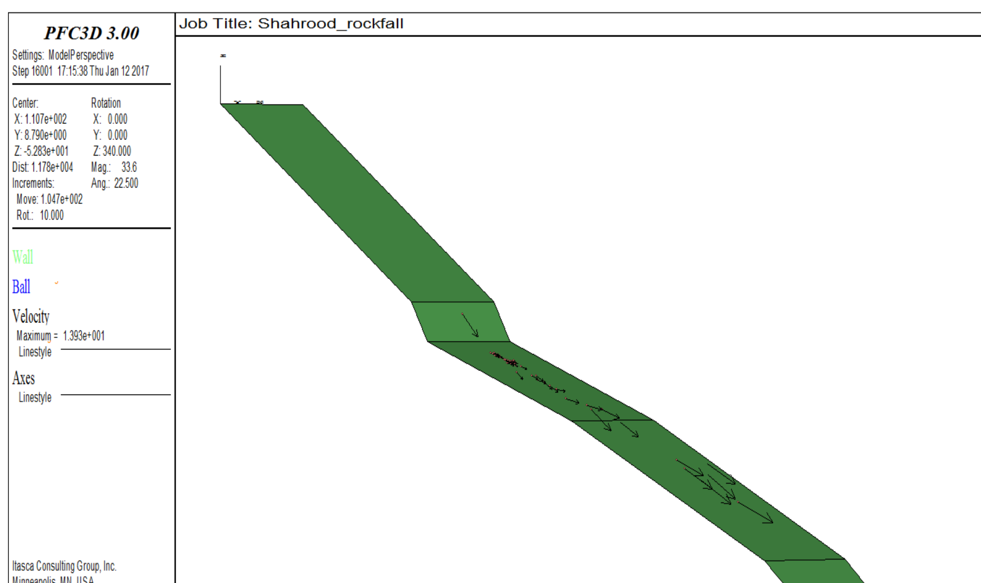
شبیه‌سازی مقطع دیواره و بلوک جداشده در تراز بالایی به‌وسیله‌ی مجموعه‌ای از عناصر کروی‌شکل و باتوجه به خواص آنها مطابق شکل (۱۱) تنظیم شده‌است.



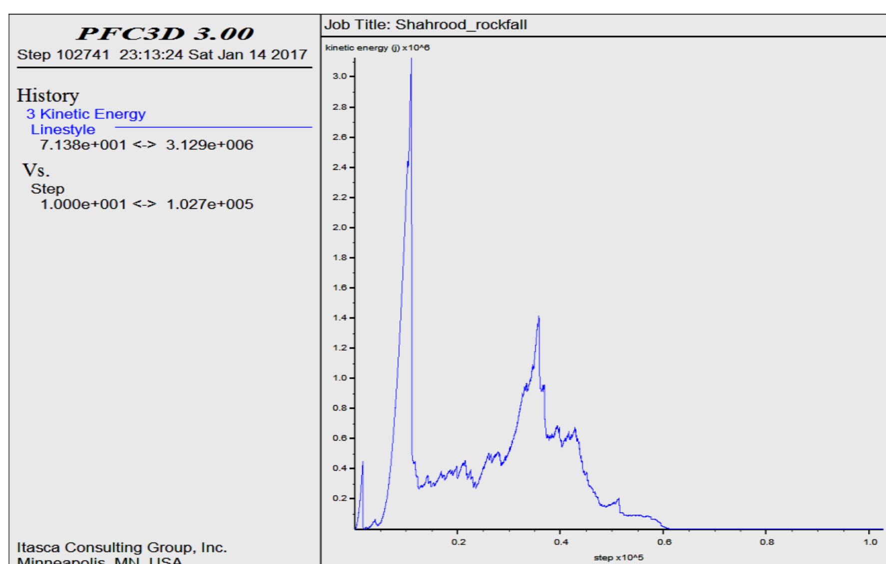
شکل ۱۱ شبیه سازی مقطع دیواره و بلوک جداشده در نرم‌افزار PFC^{3D}

در شبیه‌سازی بااستفاده از روش المان مجزا و نرم‌افزار PFC^{3D} می‌توان با تحلیل نمودارهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، به بررسی بیشتر فرایند سنگ‌افت و تحلیل مسیر حرکت، انرژی و سرعت قطعات پرداخت. در این فرایند باتوجه به این‌که شبیه‌سازی در سه بعد انجام می‌شود، در طول محاسبه تماسی که بین ذرات با ذرات و ذرات با دیواره وجود دارد به‌صورت خودکار شناسایی می‌شوند. در این نرم‌افزار می‌توان حرکت قطعات در طی مراحل مختلف را به‌دست آورد؛ به‌عنوان مثال شکل (۱۲) محل قرارگیری قطعات بعد از ۱۶۰۰ گام را نشان می‌دهد. در این مقاله، فرایند شبیه‌سازی در ٤۰۰۰۰ مرحله برای بررسی حرکت قطعات در طول دامنه انجام شده‌است.

باتوجه به نمودار انرژی جنبشی کل در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود بلوک پس از جدا شدن از جایگاه ابتدایی خود به‌دلیل وزن زیاد بلوک، دارای انرژی جنبشی بالایی است؛ این انرژی پس از برخورد بلوک با سطح دامنه و تبدیل شدن آن به قطعات کوچک‌تر (شکل ۱۳) به‌شدت کاهش می‌یابد و نیز مقداری از انرژی ذخیره‌شده در بلوک به‌دلیل برخورد کاهش می‌یابد. پس از این کاهش انرژی قطعات حاصل شروع به حرکت در سطح دامنه می‌کنند که این حرکت همراه با افزایش انرژی جنبشی است. اما این افزایش تا زمانی ادامه می‌یابد که قطعات با برخورد به سطح دامنه انرژی و سرعت خود را از دست می‌دهند و نوع حرکت آنها از غلتش به غلتش با سرعت کمتر و لغزش تغییر می‌کند؛ و یا این‌که قطعات به سطح جاده می‌رسند و بعد از برخورد با سطح جاده تعدادی از قطعات متوقف می‌شوند، اما بقیه‌ی قطعات به حرکت خود ادامه می‌دهند که این حرکت باعث افزایش انرژی جنبشی آنها می‌شود ولی این افزایش بعد از مدتی رو به کاهش و صفر شدن می‌گذارد و دلیل آن کم شدن شیب دامنه و کوچک‌تر شدن قطعات می‌باشد.



شکل ۱۲ محل قرارگیری قطعات بعد از ۱٦۰۰ گام

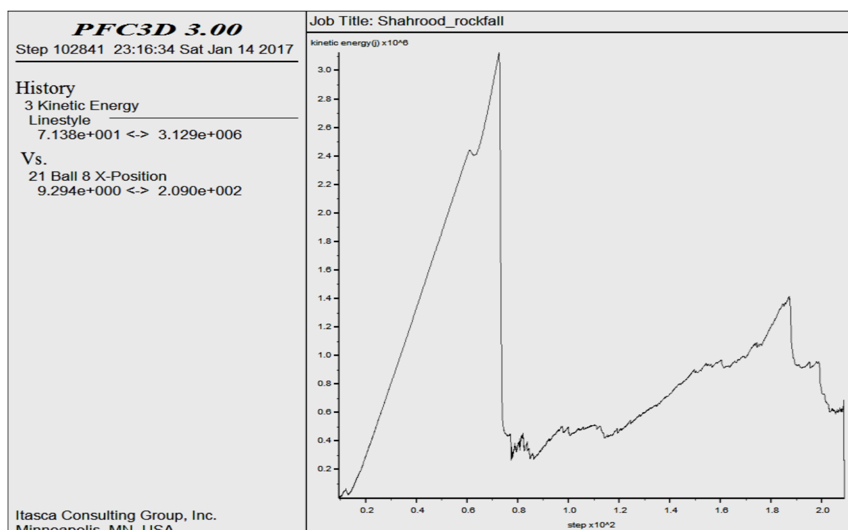


شکل ۱۳ انرژی جنبشی کل (ژول)

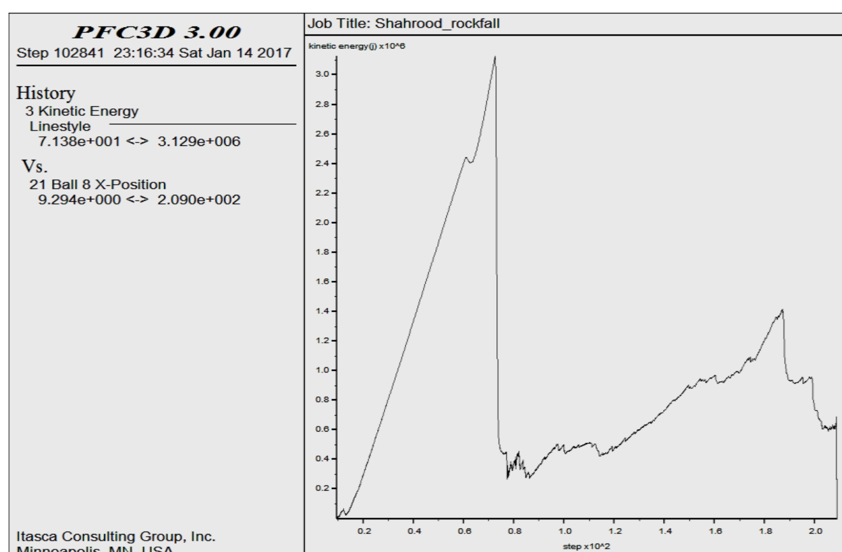
انرژی جنبشی دو توپ با محل توقف متفاوت در شکل‌های (۱٤) و (۱۵) نشان داده شده‌است. در نمودار شکل (۱٤)، توپ شماره‌ی ۸ در محدوده‌ی جاده، انرژی جنبشی برابر با صفر دارد که نشان‌دهنده‌ی این است که در سطح جاده متوقف می‌شود و قبل از آن انرژی جنبشی معادل ٤۰۰ کیلوژول دارد؛ نمودار شکل (۱۵) انرژی جنبشی توپ ۲۹ را نشان می‌دهد که این توپ با یک سیر صعودی در انرژی جنبشی حرکت می‌کند و پس از برخورد به سطح جاده انرژی آن به‌شدت کاهش می‌یابد و با عبور از سطح جاده انرژی جنبشی آن تا رسیدن به پایین شیب افزایش می‌یابد و پس از آن انرژی آن کاسته می‌شود و در فاصله‌ی ۳۵۰ متری به توقف کامل می‌رسد و انرژی جنبشی آن صفر می‌شود.

همان‌طور که در نمودار شکل‌های (۱٦) و (۱۷)

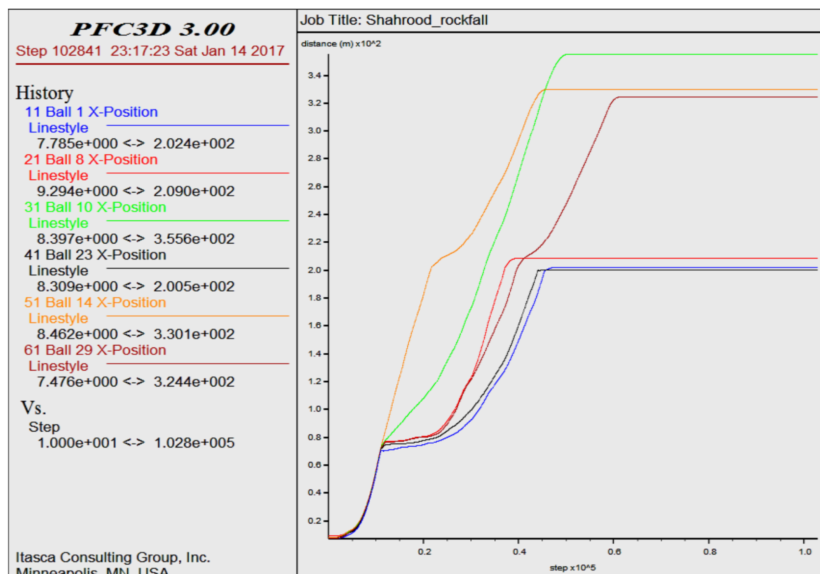
مشخص است توپ‌ها (بیانگر قطعات سنگ می‌باشند)، حالت و مکان توقف‌های متفاوتی را دارند. براساس این شکل‌ها مشاهده می‌شود که قطعات جداشده در مسیر دامنه به حرکت خود ادامه می‌دهند و تعدادی از آنها در محدوده‌ی جاده توقف دارند؛ هم‌چنین تعدادی از قطعات که در جاده متوقف شده بودند، با نیرویی که دیگر قطعات در حال افت به آنها وارد می‌کنند، به حرکت خود در دامنه ادامه می‌دهند و در انتهای دامنه متوقف می‌شوند. علاوه‌بر این، قطعاتی هم بدون این‌که توقفی در طول مسیر داشته باشند به‌سمت پایین دامنه حرکت می‌کنند؛ به‌دلیل عدم توقف، انرژی جنبشی در این قطعات افزایش می‌یابد و این افزایش باعث می‌شود قطعات مسیر طولانی‌تری را نسبت‌به دیگر قطعات طی کنند. به‌علاوه باتوجه به شبیه‌سازی انجام‌شده که در شکل (۱٦) نشان داده شده‌است، بیشترین جابه‌جایی اتفاق‌افتاده در فاصله‌ی افقی ۳۹۳ متری از منشأ ریزش می‌باشد.



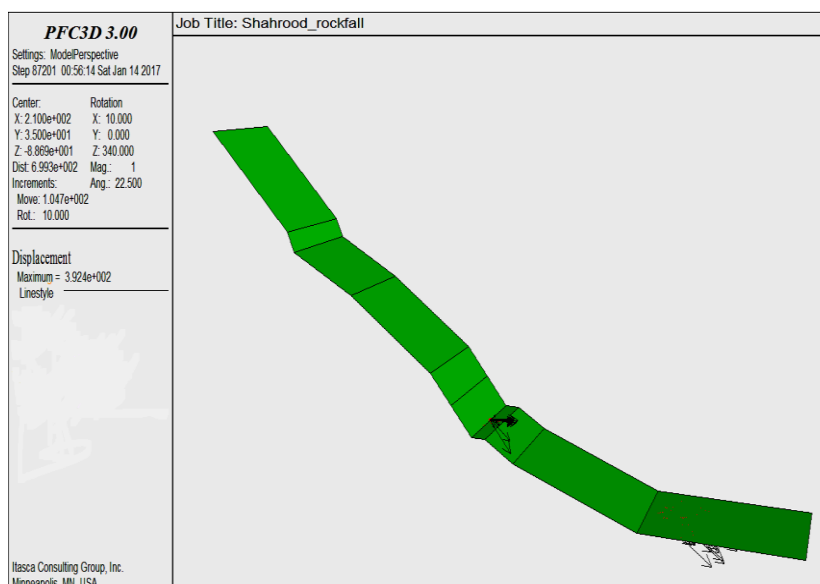
شکل ۱٤ انرژی جنبشی توپ ۸



شکل ۱۵ انرژی جنبشی توپ ۲۹



شکل ١٦ محل توقف توپ‌های مختلف برروی دامنه



شکل ١٧ بیشترین مسافت طی شده توسط توپ‌ها

براساس نمودارهای به‌دست آمده از شبیه‌سازی بااستفاده از نرم‌افزار المان مجزا PFC^{3D} می‌توان نتایج زیر را به‌دست آورد:

باتوجه به نمودار انرژی جنبشی کل حاصل از سنگ‌افت

۱. در طول مسیر حرکت مشاهده می‌شود که وقتی قطعات به مسیر جاده می‌رسند، انرژی جنبشی آنها معادل ٤٠٠ تا ٦٠٠ کیلوژول است و همچنین قطعات با انرژی جنبشی معادل ١٠٠ کیلوژول به مناطق مسکونی می‌رسند که درصورت سنگ‌افت خسارت‌های جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت.

۲. همان‌طور که در نمودار انرژی جنبشی مشخص است، وقتی بلوک به‌صورت یکپارچه شروع به حرکت می‌کند انرژی جنبشی زیادی دارد و وقتی به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شود انرژی آن به‌شدت کاهش

می‌یابد؛ از این کاهش انرژی می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش ابعاد و وزن قطعات یک روش مناسب برای کم کردن انرژی جنبشی قطعات، خسارات و خطرات ناشی از آنها است.

۳. باتوجه به نمودارها و شکل توقف توپ‌ها در دامنه، اگر سنگ‌افت اتفاق بیافتد، تعداد زیادی از قطعات در محدوده‌ی جاده‌ها و مناطق مسکونی توقف دارند که این توقف‌ها راه‌بندان در جاده و خطرات مالی و جانی را در پی دارند.

٤. باتوجه به این‌که بیشترین فاصله‌ی افقی طی‌شده توسط قطعات ۳۹۳ متر می‌باشد، احتمال حادثه در اثر سنگ‌افت بسیار بالا می‌رود چرا که فاصله‌ی افقی مناطق مسکونی ۳٤۰ متری می‌باشد و تعداد زیادی از قطعات به این فاصله خواهند رسید.

برای جلوگیری از رسیدن قطعات به سطح جاده همان‌طور که گفته شد یکی از روش‌ها می‌تواند کم کردن وزن و ابعاد قطعات در منشأ ریزش باشد. روش دیگری که می‌شود از آن استفاده کرد ایجاد یک دیواره‌ی حائل در مسیر است که باتوجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار Rocfall می‌توان محل قرار گرفتن آن را مشخص کرد. از طرفی چون قطعات در مسیر حرکتی خود به سطح جاده برخورد می‌کنند و بعد از این برخورد به‌صورت جهش به حرکت ادامه می‌دهد، برای جلوگیری از ادامه‌ی این حرکت می‌توان از جوی ضربه‌گیر که کف آن با ماسه پوشیده شده و یک دیواره در کنار جاده استفاده کرد. این کار باعث می‌شود انرژی قطعات در برخورد با ماسه کاسته شود و بااستفاده از دیواره‌های فلزی یا بتنی کنار جوی از ادامه‌ی حرکت آنها جلوگیری کرد و قطعات را در کنار جاده به دام انداخت. باتوجه به این‌که توپوگرافی شیب عامل مهمی در سنگ‌افت به‌شمار می‌رود، تغییر در توپوگرافی با ایجاد یک پله در دامنه نیز می‌تواند روش کارآمدی برای جلوگیری از سنگ‌افت باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. از جمله عواملی که در ارزیابی پدیده‌ی سنگ‌افت تأثیر دارند می‌توان به عوامل توپوگرافی نظیر هندسه‌ی شیب، وزن قطعات سنگی، منشأ ریزش سنگ‌ها و خواص مکانیک سنگی دامنه اشاره کرد. باتوجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت اصلی‌ترین عامل کنترل‌کننده‌ی حرکت قطعه سنگ برروی شیب، عامل توپوگرافی است.

۲. باتوجه به این‌که انرژی قطعات سنگی با میزان مخرب و خطرناک بودن آن رابطه‌ی مستقیم دارد، از این‌رو هر چه انرژی جنبشی در قطعات بیشتر باشد میزان خسارات ناشی از آن بیشتر خواهد شد. بنابراین باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی‌ها، می‌توان با ایجاد تغییرات مناسب در عواملی که در سنگ‌افت مؤثر هستند میزان خسارت‌های احتمالی از آن را کاهش داد یا به صفر رساند. ایجاد تغییر در هندسه‌ی شیب، تغییر در ابعاد قطعات، ایجاد موانع در مکان مناسب در مسیر حرکت قطعات از راهکارهای مناسب به‌شمار می‌روند.

۳. در این مقاله سنگ‌افت بااستفاده از نرم‌افزار Rocfall شبیه‌سازی شده‌است و باتوجه به نتایج حاصل از آن این پدیده مورد بررسی قرار گرفته‌است. از آنجایی که این نرم‌افزار فقط مسیر حرکت را شبیه‌سازی می‌کند و عواملی نظیر شکل، اندازه و وزن قطعات در شبیه‌سازی تأثیری ندارد و فعل و انفعال بین ذرات در مسیر حرکت درنظر گرفته نشده‌است و ذرات را جدا از هم و منفرد در نظر گرفته‌است و باتوجه به این‌که در واقعیت قطعات در حال ریزش و سقوط برروی یکدیگر تأثیر گذارند، نتایج حاصل از شبیه‌سازی این نرم‌افزار با واقعیت سنگ‌افت فاصله دارد. از این‌رو برای پوشش و رفع نواقص و ضعف‌های این نرم‌افزار از نرم‌افزار PFC^{3D} استفاده شده‌است. در این نرم‌افزار علاوه‌بر در نظر گرفتن فعل و انفعال بین ذرات و دیواره‌ها، فعل و انفعال بین یک ذره با ذرات دیگر نیز

در نظر گرفته شده‌است تا به شرایط موجود در طبیعت نزدیک‌تر باشد تا بتوان نتایج قابل قبول و مطمئن‌تری را از شبیه‌سازی به‌دست آورد.

٤. بااستفاده از این دو نرم‌افزار که مکمل هم هستند می‌توان تحلیل بهتری از سنگ‌افت در یک دیواره داشت و براساس نتایج حاصل از آنها خطرات احتمالی در صورت سنگ‌افت را مشخص کرد و اقدامات حفاظتی و پیشگیرانه‌ی لازم و مناسب را درجهت کاهش این خطرات انجام داد و خسارت‌های جانی و مالی ناشی از آنها را به حداقل رساند.

۵. ضمنا پیشنهاد می‌شود به‌عنوان تحقیق بعدی برای اندرکنش داخلی توده در نرم‌افزار PFC مجموعه‌ای از دانه‌ها (با اندازه‌ی کوچک‌تر) و انتخاب پارامترهای متناسب با سنگ منطقه مدل‌سازی شود تا انعکاس واقعی‌تری از سقوط سنگ در منطقه به‌دست آید.

مراجع

1. Azzoni, A., La Barbera, G., and Zaninetti, A., "Analysis and Prediction of Rocfalls Using a Mathematical Model", *in International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* Vol. 32, No. 7, pp. 709-24, (1995).
2. Azzoni, A., and De Freitas, M., "Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis", *Rock mechanics and rock engineering,* Vol. 28, No. 2, pp. 111-124 ,(1995).
3. Nicot, F., Cambou, B., and Mazzoleni, G., "Design of Rocfall Restraining Nets from a Discrete Element Modelling", *Rock Mechanics and Rock Engineering,* Vol. 34, No. 2, pp. 99-118 ,(2001).
4. Guzzetti, F., et al., "STONE: A Computer Program for the Three-dimensional Simulation of Rock-falls", *Computers & Geosciences,* Vol. 28, No. 9, pp. 1079-1093 ,(2002).
5. Duarte ,R. M. and Marquínez, J., "The Influence of Environmental and Lithologic Factors on Rocfall at a Regional Scale: An Evaluation Using GIS", *Geomorphology,* Vol. 43, No. 1-2, pp. 117-136 ,(2002).
6. Chau, K. T., Wong, R., and Wu, J., "Coefficient of Restitution and Rotational Motions of Rocfall Impacts", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Vol. 39, No. 1, pp. 69-77 , (2002).
7. Baillifard, F., Jaboyedoff, M., and Sartori, M., "Rocfall Hazard Mapping Along a Mountainous Road in Switzerland Using a GIS-based Parameter Rating Approach", *Natural Hazards and Earth System Sciences,* Vol. 3, No. 5, pp. 435-442 ,(2003).
8. Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Ghigi, S., "Rocfall Hazard and Risk Assessment Along a Ortattranspion Corridor in the Nera Valley, Central Italy", *Environmental management,* Vol. 34, No. 2, pp. 191-208 ,(2004).
9. Chau, K. T., Tang, Y., and Wong, R. H., "GIS Based Rocfall Hazard Map for Hong Kong", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Vol. 41 ,No. SUPPL. 1 ,(2004).
10. Perret, S., Stoffel, M., and Kienholz, H., "Spatial and Temporal Rocfall Activity in a Forest Stand in the Swiss Prealps—a Dendrogeomorphological Case Study", *Geomorphology,* Vol. 74, No. 1-4, pp.

219-231 ,(2006).

11. Saboya Jr ,F., da Glória Alves, M., and Pinto, W. D., "Assessment of Failure Susceptibility of Soil Slopes Using Fuzzy Logic", *Engineering geology,* Vol. 86, No. 4, pp. 211-224 ,(2006).
12. Batterson, M., McCuaig, S., and Taylor, D., "Mapping and Assessing Risk of Geological Hazard on the Northeast Avalon Peninsula and Humber Valley, Newfoundland", *Current Research. Government of Newfoundland and Labrador, Department of Natural Resources, Geological Survey,* Report, No. pp. 06-1 ,(2006).
13. Topal, T., Akin, M., and Ozden, U. A., "Assessment of Rocfall Hazard around Afyon Castle, Turkey", *Environmental Geology,* Vol. 53, No. 1, pp. 191-200 ,(2007).
14. Lan, H., Martin, C. D., and Lim, C. H., "Rocfall Analyst: A GIS Extension for Three-dimensional and Spatially Distributed Rocfall Hazard Modeling", *Computers & Geosciences,* Vol. 33, No. 2, pp. 262-279 ,(2007).
15. Giacomini, A., et al., "Experimental Studies on Fragmentation of Rock Falls on Impact with Rock Surfaces", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Vol. 46, No. 4, pp. 708-715 , (2009).
16. Choi, Y., et al., "Engineering Geological Investigation into Rocfall Problem: A Case Study of the Seated Seokgayeorae Image Carved on a Rock Face at the UNESCO World Heritage Site in Korea", *Geosciences Journal,* Vol. 13, No. 1, pp. 69-78 ,(2009).
17. Tunusluoglu, M., and Zorlu, K., "Rocfall Hazard Assessment in a Cultural and Natural Heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey)", *Environmental geology,* Vol. 56, No. 5, pp. 963-972 ,(2009).
18. Antoniou, A. A., and Lekkas, E., "Rocfall Susceptibility Map for Athinios Port, Santorini Island, Greece", *Geomorphology,* Vol. 118, No. 1-2, pp. 152-166 ,(2010).
19. Rammer, W., et al., "Evaluation of a 3-D Rocfall Module within a Forest Patch Model", *Natural Hazards and Earth System Sciences,* Vol. 10, No. 4, pp. 699-711 ,(2010).
20. Huang, C.-C. and Yuin, S.-C., "Experimental Investigation of Rainfall Criteria for Shallow Slope Failures", *Geomorphology,* Vol. 120, No. 3-4, pp. 326-338 ,(2010).
21. Volkwein ,A., et al., "Rocfall Characterisation and Structural Protection– A Review", *Natural Hazards and Earth System Sciences,* Vol. 11, No. 9, pp. 2617-2651 ,(2011).
22. Spadari, M., et al., "Statistical Evaluation of Rocfall Energy Ranges for Different Geological Settings of New South Wales, Australia", *Engineering geology,* Vol. 158, No. pp. 57-65 ,(2013).
23. Youssef, A. M., et al., "Assessment of Rocfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah City (Saudi Arabia) Using Spatio-temporal Remote Sensing Data and Field Investigation", *Journal of African Earth Sciences,* Vol. 101, No. pp. 309-321 ,(2015).
24. Keskin, B., et al., "Investigation of Rocfall Potential of Zonguldak-Kilimli Roadway (Turkey)",

Arabian Journal of Geosciences, Vol. 13, No. 16, pp. 1-11 ,(2020).

25. He, K., et al., "Failure Mode Analysis of Post-seismic Rocfall in Shattered Mountains Exemplified by Detailed Investigation and Numerical Modelling", *Landslides*, Vol. 18, No. 1, pp. 425-446 ,(2021).
26. Stevens, W. D., RocFall, A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rocfalls, (1998).
27. Preh, A. and Poisel, R., 3D یodelling of Rock Mass Falls Using the Particle Flow Code PFC3D. 2007: na.
28. Lee, J.-H., et al., "Evaluation of Land Subsidence Risk Depending on Grain Size and Verification Using Numerical Analysis", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 2, pp. 133-141,(2017).